

Mariusz Łaciak*

OCENA NIEPEWNOŚCI WYNIKÓW STATYCZNEJ SYMULACJI SIECI GAZOWYCH

W chwili obecnej w przemyśle gazowniczym oferowane są wielorakie rozwiązania oparte na symulacjach sieci gazowych. Korzystający z nich mogą wybierać spośród metod dotyczących parametrów przepływającego gazu, wykrywania nieszczelności, przepływów wielofazowych i nieustalonych, optymalizacji sieci itp. Przy większości wykonywanych symulacji użytkownicy pracują wciąż na bazie modeli statycznych. Wraz z ich rozwojem otrzymuje się coraz doskonalsze narzędzia, wyposażone w interfejsy graficzne, zestawy możliwych do zastosowania rozwiązań technologicznych oraz szczegółowe modele wyposażenia armaturowego sieci. Modele statyczne zawierają obecnie szczegółowe schematy sieci gazowych, wyposażone są w bazy danych wejściowych oraz bazy danych dotyczących metod rozwiązań danego problemu, podają informację o błędach, przez to są łatwiejsze i szybsze do zastosowania. Otrzymane wyniki niestety nie zawsze są wynikami realnymi w przypadku funkcjonujących sieci, niedostatecznie odzwierciedlają ich stan faktyczny.

Bardzo często osoby, które w swojej pracy posiłkują się modelami symulacyjnymi wykorzystują tylko fragmenty danego modelu, zaniedbując całość otrzymywanych rozwiązań. Postęp, który obserwuje się w doskonaleniu oprogramowania, skłania użytkowników do budowy coraz to nowych, większych i bardziej skomplikowanych wersji modeli. Z reguły koncentrują się oni na poszczególnych fragmentach sieci gazowej i w momencie osiągnięcia stanu stacjonarnego akceptują uzyskane wyniki jako obowiązujące, nie przeprowadzając całościowej analizy wszystkich rozwiązań dla systemu oraz ich wpływu na funkcjonowanie sieci. Zdarza się, że przez nieuwagę uzyskuje się prawidłowe rozwiązania pod względem rachunku czysto matematycznego, ponieważ jednak dotyczą one jedynie fragmentu sieci, to w związku z tym nie mogą mieć zastosowania w sensie operacyjnym do całej sieci gazowej. Modele symulacyjne wymagają więcej elastyczności w podejściu do otrzymywanych wyników.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

Problemy występujące podczas pracy z modelami statycznymi wpływają na podanie błędnych rozwiązań. Można zgrupować je w pięciu kategoriach:

1. Wprowadzenie błędnych danych.
2. Wadliwa konstrukcja modelu.
3. Nierealne wyniki symulacji.
4. Błędy korekcyjne.
5. Zastąpienie stanu niestacjonarnego stanem stacjonarnym.

Wiele rozwiązań obarczonych jest błędem jeszcze przed rozpoczęciem symulacji. Spowodowane jest to zarówno **wprowadzeniem błędnych danych**, jak i niewłaściwym wyborem parametrów symulacji, które nie nadają się do rozwiązania podstawowego zadania.

Dotyczy to następujących problemów:

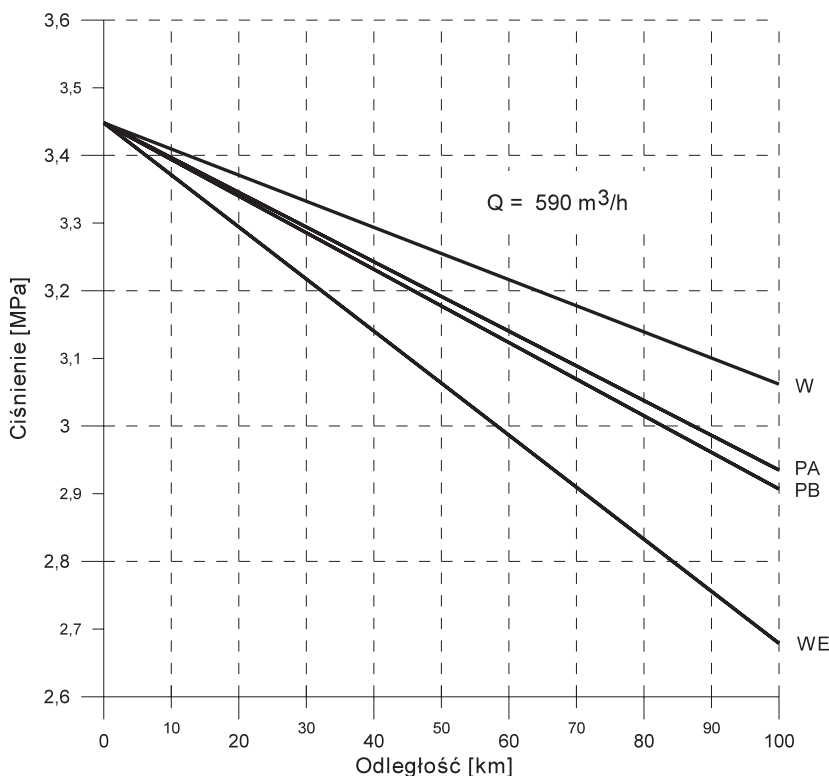
- dobór odpowiedniego równania stanu,
- wprowadzenie właściwych własności gazu przesyłanego w sieci,
- wprowadzenie właściwej różnicy wysokości, na jakiej przebiega gazociąg,
- błędne zwymiarowanie gazociągu – średnic, długości, wysokości itp.,
- błędne wprowadzenie wielkości zaworów,
- błędne dobranie urządzeń, które są siłą napędową w procesie przesyłu gazu,
- błędy przy modelowaniu rozkładu temperatur,
- błędne dobranie warunków dozoru,
- błędny dobór równania przepływu,
- stosowanie niejednostajnych jednostek pomiarów,
- zła lokalizacja stacji gazowych, itp.

Stan gazów rzeczywistych można najogólniej i najściślej opisać równaniem mającym postać wielomianów, w których objętość molowa lub ciśnienie występują jako zmienne niezależne. Równania tego typu nazywane są w literaturze **równaniami stanu**, są z zasady zależnościami empirycznymi. W praktyce stosowanych jest wiele różnych empirycznych i półempirycznych równań stanu, które dla odpowiednich układów oraz przy danych zakresach ciśnienia i temperatury dają wyniki dostatecznie zgodne z doświadczeniem. Współczynniki występujące w równaniach zależą przede wszystkim od rodzaju gazu i najczęściej są powiązane z parametrami krytycznymi gazu.

Używanie określonych równań stanu poza zakresem ich stosowalności może prowadzić do uzyskania wyników błędnych. Parametry określone przez niewłaściwe zastosowanie równania stanu mogą być przyczyną wyznaczenia błędnych spadków ciśnienia, które wynikają z modelowania symulacyjnego. W wielu przypadkach równania stanu stosowane dla układów w takim samym zakresie ciśnień i temperatur dają różniące się między sobą wyniki (rys. 1).

Pomijanie wpływu współczynnika ściśliwości Z na obliczenia przy średnich i wyższych ciśnieniach może być przyczyną powstawania istotnych błędów [3].

Własności płynów (gęstość, lepkość, ciężar właściwy, itp.) mają bezpośredni wpływ na spadki ciśnienia i zmiany wymagań eksploatacyjnych sieci gazowych. Przybliżenie wartości niektórych własności gazu, w sytuacji, gdy nie posiadamy aktualnych danych laboratoryjnych dotyczących tych wielkości, może być przyczyną znacznych błędów.



Rys. 1. Wpływ zastosowania różnych równań hydraulicznych na spadek ciśnienia gazu w gazociągu, W – Walden, PA – Panhandle A., PB – Panhandle B., WE – Weymouth [2]

W gazociągach w czasie przepływu gazu zmieniają się warunki termodynamiczne, co wpływa na zmiany własności gazu. Efekt ten potęguje się wraz ze wzrostem wielkości sieci gazowej, na co najistotniejszy wpływ ma różnica ciśnień panująca w gazociągu.

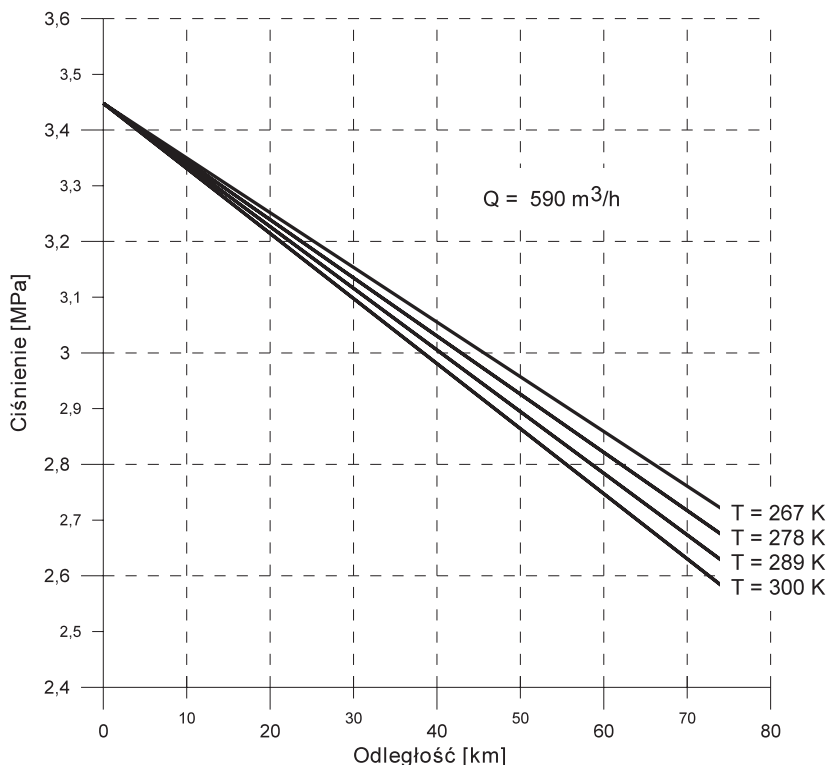
Z **wysokością położenia** poszczególnych punktów sieci gazowej mogą być związane dwa rodzaje błędów – nieprawidłowe określenie wartości parametru wysokości lub też jego nieuwzględnienie. Może być to wynikiem np. wprowadzania zmian w istniejącym modelu sieci gazowej bez uwzględnienia wpływu różnic wysokości związanych z nowym wyposażeniem sieci (armatura, stacje gazowe itp.).

Innym potencjalnym źródłem błędów występującym w modelach może być zignorowanie wysokości położenia poszczególnych części gazociągu, co może być przyczyną niedokładnego określenia różnicy ciśnień.

W modelowaniu sieci gazowych, w których różnice wysokości przekraczają 100 m, konieczne jest uwzględnienie tego łącznie z sieciami niskiego ciśnienia. Należy również zaznaczyć, że różnica pomiędzy ciśnieniem pomiaru a ciśnieniem absolutnym jest funkcją wysokości położenia sieci nad poziomem morza, co oznacza, że zmiana tych parametrów może być źródłem błędów.

Wprowadzenie do obliczeń symulacyjnych **nieprawidłowych parametrów zaworów**, dotyczących ich wielkości czy współczynników przeliczeniowych może wywołać błędy numeryczne i problemy w bilansowaniu. Zbyt małe zawory mogą być przyczyną dużych spadków ciśnienia oraz powodować wyliczenie zbyt dużych prędkości przepływu. Jest to nie do przyjęcia, gdyż może być źródłem zakłóceń w bilansowaniu przepływu. Zastosowanie dużych zaworów z racji braku spadku ciśnienia gazu przepływającego przez nie może spowodować trudności obliczeniowe i w efekcie prowadzi to do błędnych wyników. Użytkownik powinien oszacować, czy realne są wartości spadków ciśnienia na analizowanych zaworach.

Wielu użytkowników programów symulacyjnych do projektowania sieci gazowych decyduje się na przeprowadzenie w swoich obliczeniach kalkulacji spadku wartości temperatury. Jest to trudne zadanie ze względu na niewystarczającą do przeprowadzenia takiej symulacji liczbę danych dotyczących warunków temperaturowych. Wymiana ciepła pomiędzy przepływającym gazem a gruntem, w którym zakopany będzie gazociąg, zależy od wielu czynników, takich jak grubość ścianek rurociągu, typ gruntu, wilgotność gruntu, temperatura gruntu i głębokość ułożenia gazociągu. Wymiana ciepła zależy również od zewnętrznej i ewentualnie wewnętrznej izolacji rur.



Rys. 2. Wpływ temperatury na spadek ciśnienia gazu wg Panhandle'a w gazociągu [2]

Czynniki te mogą być przyczyną nieprawidłowego określenia współczynnika wymiany ciepła i przyczyną błędów w obliczeniach wartości spadków ciśnień. Samo zaniedbanie wpływu temperatury w niektórych przypadkach może być przyczyną znacznych błędów w obliczeniach. Dotyczy to zwłaszcza systemów przesyłowych z tłoczniami gazu oraz transportu gazu zawilgoconego lub zawierającego zbyt duże ilości kondensatu. Każdy przypadek, w którym powinno się uwzględnić lub nie wymianę ciepła, powinien być rozpatrywany indywidualnie (rys. 2).

Przepływ gazu w gazociągach jest związany z pokonaniem przez gaz oporów, które zależą m.in. od współczynnika oporu hydraulicznego, lepkości, gęstości i natężenia przepływu gazu oraz od średnicy rury i długości przewodu.

Współczynnik oporów hydraulicznych λ jest funkcją liczby Reynoldsa Re , chropowatości względnej ϵ , jak i obu tych parametrów, w zależności od charakteru przepływu w gazociągach. Przy mniejszych wartościach liczby Re oddziaływanie lepkości gazu na przepływ jest większe, $\lambda = f(Re)$. Wraz ze wzrostem wartości Re współczynnik oporu jest funkcją zarówno parametrów przepływu, jak i chropowatości $\lambda = f(Re, \epsilon)$, po czym w ostatniej strefie jest już tylko funkcją chropowatości $\lambda = f(\epsilon)$.

Współczynnik chropowatości zależy od stanu wewnętrznej ścianki rury i może przybierać różne wartości. Chropowatość rur wzrasta z wiekiem gazociągu, wzrost ten jest wynikiem działania korozji na ścianki gazociągu (metal). Samo składowanie rur przez dłuższy czas przed zamontowaniem może doprowadzić do dwu-, a nawet trzykrotnego wzrostu chropowatości. Z drugiej strony zdarza się, że gazociąg, którym przesyłany był suchy gaz wykazywał po pewnym czasie spadek chropowatości na skutek szlifowania ścian gazociągu drobnym pyłem, niesionym przez gaz. Należy również pamiętać, że chropowatość z reguły jest nierównomierna, stąd istnieje duża trudność we właściwym jej określeniu.

Prawidłowy dobór odpowiedniej zależności, określającej współczynnik oporów hydraulicznych λ w gazociągach ze względu na strefę przepływu, może stanowić przyczynę występowania lub niewystępowania błędów obliczeniowych.

W zależności od rodzaju przepływu stosowanych jest wiele zależności, służących do obliczeń hydraulicznych gazociągów (tab. 1).

Równania te łączą współczynnik oporu przepływu ze wzorem ogólnym.

Kolejny problem, który może się pojawić, dotyczy **jednostek wielkości fizycznych**, używanych do obliczeń. Należy zwrócić uwagę, czy jednostki występujące w programie obliczeniowym są takie same, jak jednostki danych wielkości fizycznych uzyskanych z danych pomiarowych. Przykładowo, czy wartość ciśnieniowa podana jest jako nadciśnienie, czy też jako wartość absolutna, w jakich jednostkach podany jest przepływ gazu, jakie są jednostki parametrów gazu, jakie są jednostki parametrów charakteryzujących gazociąg itp.

Powszechnie wiadomo, że zbyt uproszczona konstrukcja modelu symulacyjnego wpływać będzie na otrzymane wyniki. Błędy na wejściu równają się błędnym danym wyjściowym. Nawet przy najlepszych założeniach model, który wydaje się na pozór poprawny dawać może nieprawidłowe wyniki. Dotyczy to modelowania wszystkich elementów sieci gazowej, jak tłocznie, stacje gazowe itp. Przykładem może być typowy model tłoczni gazu w systemie. Uwzględnia on zarówno stacje sprężania gazu, jak i *by-pass* omijający jednostkę.

Tabela 1

Niektóre wzory semiempiryczne do obliczeń przepływu gazu w rurociągach horyzontalnych, dla sieci gazowych o ciśnieniu średnim, średnim podwyższonym i wysokim [1, 3]

Autor/nazwa równania	Formuła zależności uwzględniających współczynnik oporu jako funkcję liczby Reynoldsa [ukł. SI]
Renouard	$p_1^2 - p_2^2 = 19,408 ZTLd^{0,835} \frac{Q_n^{1,835}}{D^{4,135}}$
Panhandle A	$p_1^2 - p_2^2 = 8,443 ZTLd^{0,961} \frac{Q_n^{1,96}}{D^{4,86}}$
Panhandle B	$p_1^2 - p_2^2 = 13,414 ZTLd^{0,8539} \frac{Q_n^{1,859}}{D^{4,8539}}$
Zależności uwzględniające współczynnik oporu λ jako funkcję chropowatości względnej [ukł. SI]	
Weymouth	$p_1^2 - p_2^2 = 8,056 ZTLd \frac{Q_n^2}{D^{16/3}}$
WNIIGAZ 2	$p_1^2 - p_2^2 = 391,008 \varepsilon^{0,4} ZTLd \frac{Q_n^2}{D^5}$
Walden	$p_1^2 - p_2^2 = 51,79 \varepsilon^{0,1858} ZTLd \frac{Q_n^2}{D^5}$

Bardzo często przy budowie modelu pominięty zostaje zawór kontrolny. W niektórych przypadkach przy słabnącym wypływie gazu może to spowodować powrót gazu na sekcję ssania. Określony wskaźnik mocy jest nieprawdziwy, ponieważ przepływ cyrkuluje z powrotem przez jednostkę sprężającą.

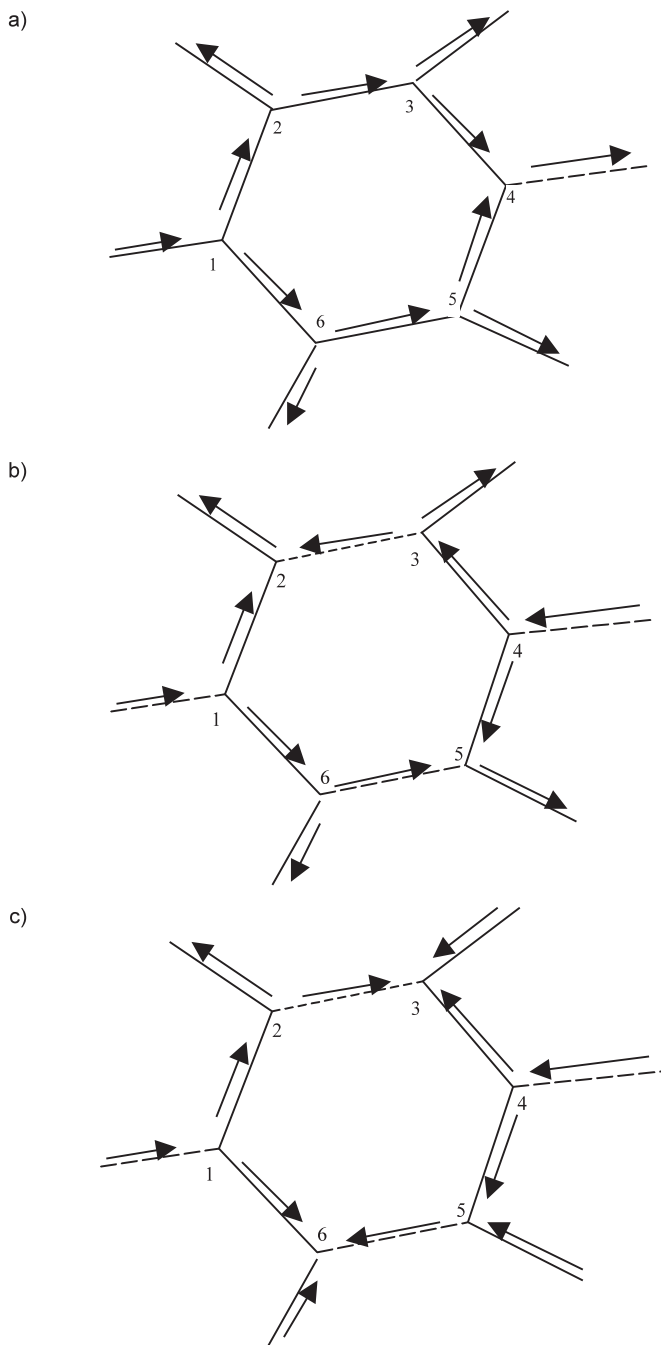
Istnieje kilka dróg rozwiązań tego problemu:

- Wiele oprogramowań posiada opcje obejścia elementu i budowa aktualnej linii obejścia (*by-pass*) nie jest w modelu konieczna.
- Jeżeli obejście jest krytyczne do modelu, użytkownik powinien upewnić się, czy zawór kontrolny jest podobnie określony jak jednostka. Następnie powinien zawsze dopasować jednostkę do zaworu kontrolnego i upewnić się, czy gdy jednostka sprężająca pracuje, zawór kontrolny jest zamknięty.

Modele sieci gazowych z reguły konstruowane są na zasadzie obliczeń zgodnych z **kierunkiem przepływu gazu** w gazociągu. Wynikiem tego jest definiowanie przepływu jako dodatniego lub ujemnego.

Wykonanie właściwych obliczeń sieci gazowych podporządkowane jest podstawowemu wymogowi, który sprowadza się do zdecydowania, jaki jest odpowiedni kierunek przepływu gazu, czyli który najbardziej odpowiada wprowadzonym danym.

Na rysunku 3. pokazano rozptyw gazu w odcinkach pierścienia, jako elementu składowego dużej sieci gazowej z większą liczbą źródeł zasilania. Podane tutaj warianty rozptywu gazu dla takiego samego pierścienia mogą być rzeczywistymi rozptywami lub założonymi.



Rys. 3. Schematy możliwych rozpiływów gazu w poszczególnych odcinkach wydzielonego pierścienia sieci gazowej: a) jedno źródło zasilania, b) dwa źródła zasilania, c) wielostronne zasilanie

Im więcej występuje źródeł zasilania sieci, tym większe prawdopodobieństwo popełnienia błędów wynikających z niewłaściwej oceny rozprężu gazu.

W stosowanych schematach obliczeniowych sieci rozdzielczych gazu najczęściej pomija się problematykę dotyczącą **lokalizacji stacji gazowych**, przede wszystkim ze względu na brak jakichkolwiek metod analitycznych dotyczących tego problemu. W praktyce projektanci wybierają przypadkowe miejsca lokalizacji stacji gazowych; wybierają optymalne rozwiązanie, na które składa się wiele czynników: uwarunkowania terenowe, szczegółowe przepisy bezpieczeństwa dotyczące lokalizacji stacji gazowych oraz funkcje, jakie pełnić powinna dana stacja w układzie sieci w stosunku do specyfiki rozmieszczenia odbiorców gazu.

Liczba stacji gazowych w zależności od wielkości sieci gazowej może być dowolna, przy czym dobór ich liczby też nie może być określony na drodze analitycznej, a tylko przy uwzględnieniu wiedzy o wielkości danej sieci, a więc częściowo uwzględniający intencje projektującego sieć.

Reduktor ciśnienia stanowiący podstawowy element wyposażenia stacji gazowej pozwala na regulację tylko wysokości ciśnienia wylotowego, która to wielkość ustalana jest na odpowiednim poziomie.

Wielkości przepływającego przez reduktor natężenia przepływu gazu nie można arbitralnie ustalać na etapie przygotowania danych. Takie konieczne założenia są często przyczyną dużych błędów przy oszacowaniu parametrów eksploatacyjnych sieci gazowych, gdy sieć zasilana jest przez więcej niż jedną stację gazową.

Sieci rozprowadzające i rozdzielcze zasilane są ze stacji gazowych o stałych ciśnieniach wylotowych, przy zmiennych natężeniach przepływu gazu wynikających z aktualnych potrzeb odbiorców i układu sieci (średnic gazociągów).

W praktyce eksploatacyjnej sieci rozdzielczych gazu występują przypadki, gdy część źródeł zasilania stacji gazowych jest nadmiernie obciążona, natomiast inne praktycznie nie występują.

Po zainstalowaniu wszystkich elementów należy upewnić się, czy wszystkie elementy (tj. natężenie przepływu, ciśnienia, chropowatość rur itp.) zostały właściwie skorygowane z aktualnymi danymi operacyjnymi.

Uwzględniając różnorodne warunki lokalizacji odbiorców i wynikające stąd istotne różnice w zużyciu gazu, opracowano tabele współczynników jednoczesności zużycia gazu w funkcji liczby odbiorców dla rejonów o różnym stopniu urbanizacji.

Zasadniczy wpływ na wielkości obliczonych natężeń przepływu gazu ma wybór **zasad oszacowywania współczynnika jednoczesności zużycia gazu**.

Oszacowywanie zużycia gazu przez daną liczbę odbiorców obarczone jest często bardzo dużym błędem w porównaniu do standardów obowiązujących dla innej, chociaż podobnej, grupy odbiorców.

Im mniejsza grupa odbiorców zasilana jest z danej sieci, tym różnice pomiędzy poszczególnymi grupami mogą być większe. W danej grupie odbiorców mogą również wystąpić problemy związane z nierównomiernym rozmieszczeniem odbiorców, nie tylko na odcinkach sieci, lecz również w odpowiedniej strefie i w rejonie zasilania.

Programy do symulacji statycznej wykorzystywane w gazownictwie zaliczone są do podstawowego oprogramowania użytkowego. Używane są przy realizacji wielu istotnych zadań, takich jak przewidywanie kształtowania się rozkładu ciśnień, przepływów i innych parametrów sieci, przygotowanie wielowariantowych programów ruchu, prowadzenie analiz przy planowanych zmianach obciążenia, projektowanie rozbudowy i modernizacji sieci, itp.

Rezultaty symulacji są na tyle zgodne z rzeczywistością, na ile dokładne i pozbawione błędów były dane, na których opierał się dany model.

Programy do symulacji (modelowania) sieci gazowych w określonych warunkach dają informacje o stanie, w jakim znajdzie się sieć po wykonaniu określonych zmian, ale nie dają odpowiedzi na pytanie, jakie należy podjąć działania, aby rozwiązania dotyczące sieci były najefektywniejsze, a koszty związane z przesyłem i dystrybucją gazu jak najmniejsze.

LITERATURA

- [1] Łaciak M., Zajda R. i inni: *Instalacje i sieci gazowe dla praktyków*, Verlag Dashofer, Warszawa 2007, suplementy 2008, 2009.
- [2] Bachman S.K.: *Steady State – Is the Solution Realistic for the Pipeing Network?*, PSIG Annual Meeting, Bern, Switzerland 2003.
- [3] Nagy S., Olajosy A., Siemek J.: *Analysis of Usefulness of Sume Algorithms for Steady State Simulation in the Loop Gas Networks*, Archives of Mining Sciences, 49.2, 2004.
- [4] Osiadacz A.: *Statyczna symulacja sieci gazowych*, Wyd. Fluid System, Warszawa 2001.